

БІЛЕЦЬКИЙ В.С., д.т.н., професор,  
СЕРГЄЄВ П.В., д.т.н., професор,

Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

## АНАЛІЗ СИЛ ЗЧЕПЛЕННЯ ВУГІЛЬНИХ ЗЕРЕН ПРИ СЕЛЕКТИВНІЙ МАСЛЯНІЙ АГРЕГАЦІЇ ВУГІЛЬНИХ ШЛАМІВ

*У статті розглянуті закономірності структуроутворення в процесах масляної агрегації вугільних шламів. Основна увага приділена адгезійним, когезійним та капілярним силам зчеплення.*

*Ключові слова: масляна агломерація, вугільні шлами, адгезія, когезія, капілярні сили зчеплення.*

**Постановка проблеми та стан її вивчення.** Одним з спеціальних процесів збагачення вугільних шламів є селективна масляна агрегація, яка поєднує сукупність процесів структурування тонкої полідисперсної вугільної фази у водному середовищі за допомогою масляних реагентів. В основі процесів селективної масляної агрегації вугілля лежить механізм адгезійної взаємодії олеофільної вугільної поверхні з маслами, в результаті якого досягається її селективне змочування і агрегування в турбулентному потоці води. Гідрофільні часточки, не змочувані маслом до складу агрегатів не входять, що дозволяє виділяти їх у вигляді породної суспензії.

В залежності від режимних параметрів, технологічної схеми, досягаемого результату, зокрема, виду продукту агрегації виділяють масляну грануляцію (МГ), агломерацію (МА) та флокуляцію (МФ). При грануляції та агломерації в процес втягуються зерна вугілля до 3-5 мм, а при флокуляції - не більше 0,1-0,2 мм. Гранулят являє собою моно- або полідисперсний сипучий продукт, складений з шаровидних і овальних гранул крупністю від 0,5-0,7 мм до 7-10 мм. Агломерат - це частково згранульоване полідисперсне вугілля представлене вуглемасляними комплексами крупністю від 0,2-0,3 мм до (1,1 - 1,3)  $d_{\max}$  ( $d_{\max}$  - максимальний діаметр вугільного зерна). Флокули - пухкі або ущільнені вуглезв'язуючі комплекси крупністю не більше 0,2-0,3 мм. [1-5]. Процес масляної агрегації застосовувався зокрема для збагачення і зневоднення коксівного вугілля на Губахінському і Авдіївському КХЗ [6-9].

У теоретико-прикладному плані стоїть питання визначення сил зчеплення вугільних зерен у вуглемасляному агрегаті, які визначають їх міцність, і, отже, можливість видалення та зневоднення.

**Мета роботи** – визначення і аналіз закономірностей структуроутворення в процесах масляної агрегації вугільних шламів, встановлення основних сил зчеплення вугільних зерен у агрегатах різних типів.

**Виклад основного матеріалу.** Узагальнення результатів виконаних експериментальних досліджень вугільних агрегатів та ~200 аншліфів

агломератів, гранул, флокул дозволили виділити такі *основні типи структур* вугільних агрегатів (рис. 1):

1 - ущільнені утворення, характерні наявністю тонких граничних плівок зв'язуючого між окремими зернами;

2 - структури з ввігнутими менісками зв'язуючого між зернами вугілля на поверхні агрегату;

3 - краплі зв'язуючого, заповнені вугільними зернами;

4 - пухкі утворення (скупчення) вугільних зерен зв'язані місточками зв'язуючої речовини.

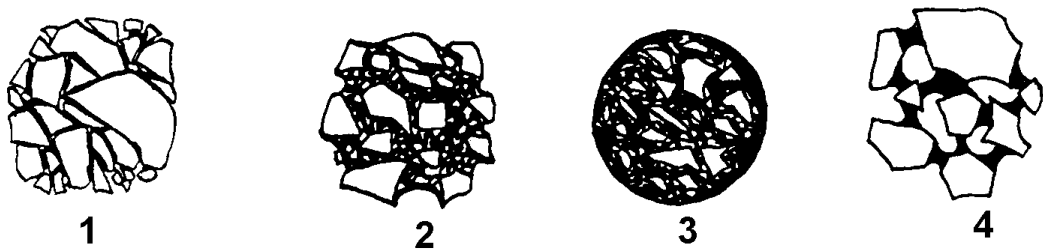


Рис. 1. Основні типи структур вугільних агрегатів

Розглянемо сили зчеплення вугільних зерен у агрегатах різних структурних типів.

**Сила аутогезійного зчеплення вугільних зерен в агрегатах I та IV типу**  $F_a^{I,IV}$  в загальному випадку визначається капілярною  $F_k$  та когезійною  $F_{ко}$  складовою, силою Ван-дер-Ваальсових взаємодій вугільних зерен  $F_m$  та розклинюючою силою  $F_p$  тонких шарів зв'язуючого:

$$F_a^{I,IV} = F_{\text{ж}} + F_{\text{ж}''} + F_{..} - F_p \quad (1)$$

Позначимо  $l_b$  відстань між вугільними зернами. При  $l_b > 2h_a$  відсутні молекулярна, асорбційна, структурна та стерична складові  $F_p$  [10]. Електростатичну складову цієї сили можна не враховувати внаслідок, по-перше, аполярності зв'язуючого [11], а по-друге, стікання зарядів у водному середовищі. Тому  $F_p \cong 0$ . За нашими мікроскопічними дослідженнями відстані між вугільними зернами в агрегатах I типу, як правило, більші 1-2 мкм, тоді як основна складова Ван-дер-Ваальсових сил – дисперсійна – діє, починаючи з 0,5-0,85 нм [10]. Це дає можливість знехтувати фрагментарними випадками  $l_b < 0,85$  нм і прийняти  $F_m \cong 0$ . Отже,  $F_a^I$  визначається силами  $F_k$  та  $F_{ко}$ .

Згідно [12] для сферичних зерен

$$F_k^{c\phi-c\phi} = \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_{\text{ш}}}{1 + \text{tg}\beta / 2} \cdot \cos\theta_{\text{вм}} \quad (2)$$

для сферичного зерна і площини

$$F_k^{c\phi-пл} = 2F_k^{c\phi-c\phi} \quad (3)$$

де  $\sigma_n$  - поверхневий натяг зв'язуючого;  $r$  - радіус зерна;  $k_{ш}$  - коефіцієнт шорсткості, який визначається по виразу  $k_{ш} = 1/\cos\gamma_m$ ;  $\gamma_m$  - середня крутизна мікрорельєфу поверхні;  $\beta$ ,  $\theta_{вм}$  - згідно рис. 2. Слід підкреслити, що для зерен  $R \gg r$  міцність їх капілярного зв'язку вдвоє більша, ніж рівновеликих зерен.

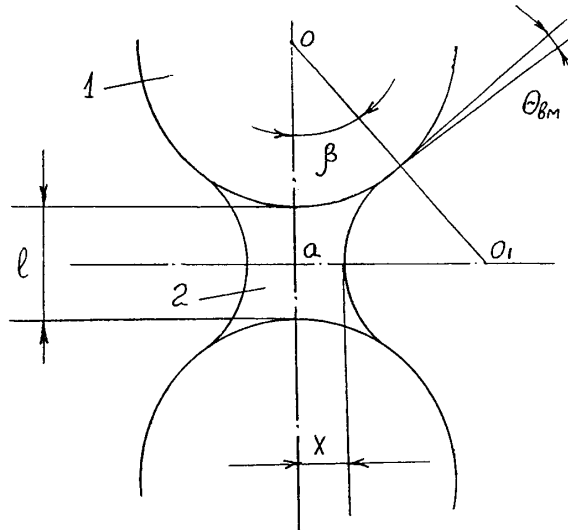


Рис. 2. До розрахунку сил аутогезійного зчеплення омаслених вугільних зерен:  
1 - вугільне зерно 2 - зв'язуюча речовина.

Для когезійної складової сил зчеплення маємо:

$$F_{к о} = \beta_{к о} \cdot S_{к о} \quad (4)$$

де  $\beta_{к о}$  - когезійне напруження зв'язуючого;  $S_{к о}$  - поверхня між зернами, передаюча когезійне напруження.

Розглядаючи трикутник  $OO_1a$  рис.2., можна показати, що

$$x = r \cdot f(\beta) \quad (5)$$

$$\text{де } f(\beta) = \begin{cases} \left[ (\sec\beta - 1)^2 + 2(\sec\beta - 1) \right]^{0,5} - (\sec\beta - 1); & l_b \ll r \\ \left[ (1,5\sec\beta - 1)^2 + 2(1,5\sec\beta - 1) - 1,25 \right]^{0,5} - (1,5\sec\beta - 1); & l_b \ll r \end{cases} \quad (6)$$

Тоді

$$S_{к о} = \pi \cdot x^2 = \pi \cdot r^2 \cdot k_{\beta}, \quad k_{\beta} = [f(\beta)]^2 \quad (7)$$

$$F_{к о} = \beta_{к о} \cdot \pi \cdot r \cdot k_{\beta} \quad (8)$$

Отже, при  $l_b > 2h_a$  для  $F_a^{I,IV}$  маємо

$$F_a^{I,IV} = \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_{ш}}{1 + \operatorname{tg}\beta / 2} \cdot \cos\theta_{вм} + \beta_{к о} \cdot \pi \cdot r \cdot k_{\beta} . \quad (9)$$

При  $l_b \leq 2h_a$  суттєву роль у зчепленні омаслених вугільних зерен починає відігравати розклинюючий тиск  $F_p$  зв'язуючого. При  $l_b \leq 2h_a$  розгорнутий вираз (1) має вигляд

$$\begin{aligned} F_a^{I,IV} = & \frac{2\pi \cdot \sigma_n \cdot r \cdot k_{ш}}{1 + \operatorname{tg}\beta / 2} \cdot \cos\theta_{вм} + \beta_{к о} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k_{\beta} - \left[ \frac{\epsilon_b}{8\pi} (E_h^2 - E_0^2) + \right. \\ & + A_0 / 6\pi h_a^3 + k / S_{вп} \cdot h_a^2 (h_a / 2l) + kT \int_0^{C_0} \frac{\partial \Gamma_1}{\partial h} \frac{dC}{C_0} + \\ & \left. + k_{п ар} T \int_0^{C_{0п ар}} \frac{\partial \Gamma_{п ар}}{\partial h} \frac{dC}{C_0} + 2\Pi_m(h) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

При в'язких реагентах-зв'язуючих, коли їх невелика рухомість перешкоджає виникненню капілярного меніску

$$F_a^{I,IV} = \beta_{к о} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k_{\beta} \quad \text{при } l_b > 2h_a \quad (11)$$

$$F_a^{I,IV} = \beta_{к о} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot k_{\beta} - F_p \quad \text{при } l_b \leq 2h_a \quad (12)$$

Приведені викладки є універсальними безвідносно до властивостей вугільних зерен і зв'язуючого. Для конкретних умов застосовуваність одержаних рівнянь звужується. Так для агрегатів IV типу з вугілля крупністю 0,2 (0,3) - 1 (2) мм і мазуту М100 згідно наших мікроскопічних досліджень (рис. 3, 4) завжди справедливо  $l_b > 2h_a$ , тому для них треба користуватися тільки рівняннями (9) та (11). Для агрегатів I типу з вугілля 0-1 (2; 3; 6) мм та мазуту навпаки, для ~ 90% контактів зерен справедливо  $l_b \leq 2h_a$ , тому для цих умов треба користуватися рівняннями (10) та (12).

**Сила зчеплення вугільних зерен в агрегатах II типу  $F_a^{II}$**  може бути визначена по формулі (1) при умові заміни складової  $F_k$  силою капілярного розрідження  $F_{кр}$ , обумовленою ввігнутими менісками зв'язуючого між вугільними зернами на поверхні агрегату. При об'ємній частці пустот в загальному об'ємі агрегату  $\epsilon_a = 0,25 \dots 0,40$  [1]:

$$F_{кр} = (0,65 \dots 1,10) F_k \quad (13)$$

Для одержаних нами з вугілля крупністю 0-1; 0-2; 0-3; 0-6 мм та мазуту гранул  $\epsilon_a = 0,30 \dots 0,38$ . Інтерполюючи дані [1] для цих гранул II типу маємо:

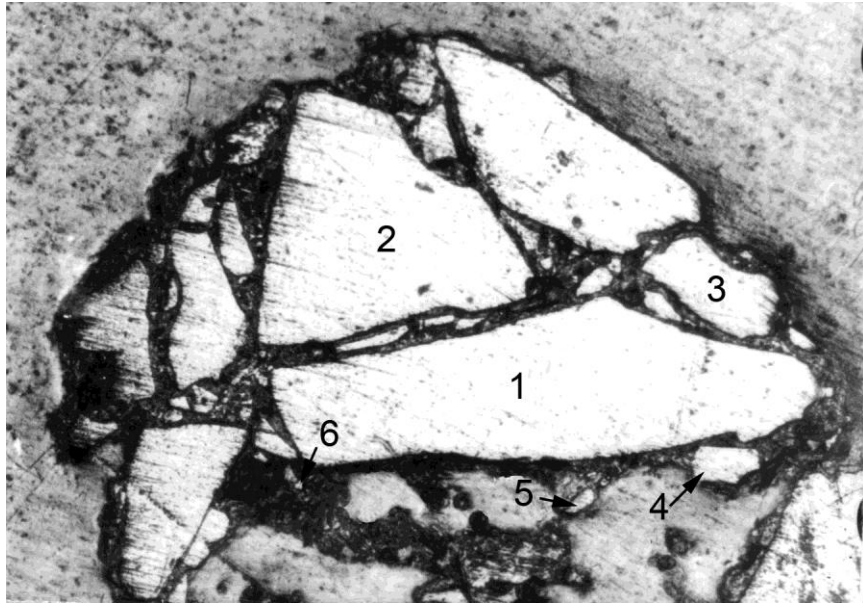


Рис.3. Аншліф вуглемасляної гранули:  
вугілля марки Г; вміст реагента – мазута  
«М100» 12 мас%; крупність вугілля 0-1 мм;  
збільшення x125; 1-6 – вугільні зерна .

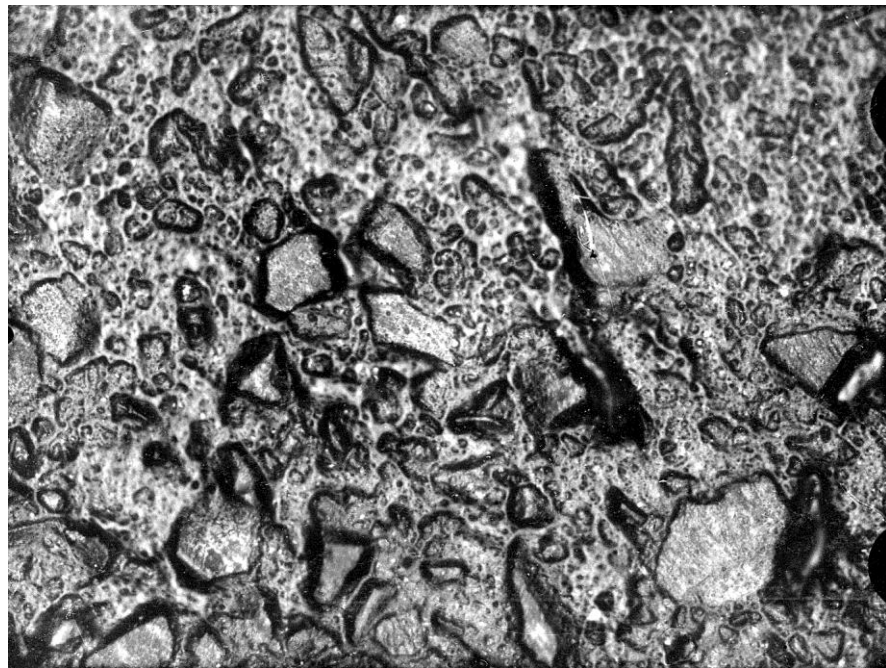


Рис. 4. Аншліф вуглемасляної гранули:  
вугілля марки Г; вміст реагента – мазута  
«М100» 25 мас%; крупність вугілля 0-0,1 мм;  
збільшення x200.

$$F_{кр} = (0,78...1,00)F_k \quad (14)$$

Таким чином, силу зчеплення  $F_a^{II}$  для випадків  $l_b > 2h_a$ ,  $l_b \leq 2h_a$  можна знайти використовуючи рівняння (9), (11), (12) та (14). При цьому випадок  $l_b \leq 2h_a$  для вуглемасляних агрегатів II типу має виключно фрагментарний

характер. Він зовсім нетиповий для вуглемазутних гранул, про що свідчать наші дослідження їх аншліфів.

Відзначимо, що зі збільшенням анізодіаметричності форми частинок відстань  $2h_a$ , імовірно, зменшується, так як на гранях і ребрах зерен граничні шари зв'язуючого мають меншу товщину. Тому форма вугільних зерен суттєво впливає на характер структуроутворюючих сил в агрегаті.

Для агрегатів III типу агрегатоутворюючою є тільки сила поверхневого натягу, яку для краплі можна визначити по закону Тейта, або уточнюючому його рівнянню Гаркінса-Брауна [13]:

$$\sigma_n = \frac{P_{кр}}{2\pi \cdot r_k \cdot f} \quad (15)$$

де  $P_{кр}$  – фактична вага краплі;  $r_k \cong r_{кр}$  – радіуси капіляру і краплі;  $f$  – поправочний коефіцієнт.

### Висновки

1. Мікроскопічними дослідженнями показано, що вугле-реагентні структури, які утворюються при селективній масляній агрегації вугільних шламів, можна розділити на чотири типи, для кожного з яких домінують свої сили зчеплення – капілярні, когезійні, аутогезійні, розклинюючого тиску тонких шарів зв'язуючого.

2. Запропоновано математичний апарат для визначення основних структуроутворюючих сил вугле-реагентних агрегатів. Одержані залежності можуть бути використані для визначення міцності вугле-масляних гранул, агломератів та флокул і оцінки їх технологічних властивостей як об'єктів збагачення і зневоднення вугільних шламів.

У подальших дослідженнях слід теоретично обґрунтувати раціональні межі витрат масляних реагентів для вуглемазляних структур різного типу, одержуваних з вугільних шламів.

### Література

1. Білецький В.С., Сергєєв П.В., Папушин Ю.Л. Теорія і практика селективної масляної агрегації вугілля. Донецьк: Грань, 1996 – 264 с.
2. Сергєєв П.В., Білецький В.С. Селективна флокуляція вугільних шламов органічними реагентами. Донецьк: Східний видавничий дім. 2010. – 240 с.
3. Shrauti S.M., Arnold D. W. Recovery of waste fine coal by oil agglomeration // Fuel, 1995, 74, 13, p. 454-465.
4. Харада Т., Мацуо Т. Агломерація у рідинах// Ніхон Коґьо Кайсі. - 1982. - № 1134, С. 714-722.

5. Fine coal processing/ Ed Mishra Surendra K., Klimpel Richard R. - Park Ridge., N.J.: Noyes Publ., 1989. - 450 p.
6. Черемонов В.М. Исследование и разработка комплексной технологии обогащения и глубокого обезвоживания угольных шламов с добавкой вязких органических продуктов. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - М.: 1973. - 25 с.
7. Черемонов Б.М., Циперович М.В. Обогащение угольной мелочи методом масляной флотации// Подготовка и коксование углей. - Свердловск, 1967, вып. 7, С. 234-261.
8. А.с. 289117 СССР. МКИ С10В 57/12. Способ переработки угольной шихты/ В.М.Черемонов, М.В.Циперович, В.П.Курбатов. ВУХИН. - Заявл. 25.08.67. № 1182688/25-26. Опубл. 08.12.70. Бюл. № 1. - 4 с.
9. Елишевич А.Т., Папушин Ю.Л., Белецкий В.С. Обогащение угольных шламов методом масляной агломерации// Кокс и химия. - 1991, № 5. - С. 7-9.
10. Духин С.С., Рулев Н.Н., Димитров Д.С. Коагуляция и динамика тонких пленок. - К.: Наукова думка, 1986. - 226 с.
11. Дерягин Б.Н., Чураев Н.В. Адсорбция и расклинивающее давление тонких прослоек бинарных растворов// Коллоидный журнал. - 1975. Т. 37, вып. 6. - С. 1075 - 1081.
12. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. - М.: Химия, 1976. - 430 с.
13. Адамсон А.В. Физическая химия поверхностей. - М.: Мир, 1979. - 568 с.

### **В.С.Белецкий, П.В.Сергеев**

В статье рассмотрены закономерности структурообразования в процессах масляной агрегации угольных шламов. Основное внимание уделено адгезионным, когезионным и капиллярным силам сцепления.

**Масляная агломерация, угольные шламы, адгезия, когезия, капиллярные силы сцепления.**

### **V.Biletskyy, P.Sergeev**

The article deals with the regularities of structure formation in the processes of aggregation of oil-coal slurry. Emphasis is placed on the adhesive, cohesive and capillary forces of adhesion.

**Oil agglomeration, coal slurry, adhesion, cohesion, capillary adhesion forces.**